



Optimasi Sinyal *Ramp Metering* pada Lalu Lintas Perkotaan yang Didominasi Sepeda Motor Menggunakan NSGA-II

Siti Raudhatul Fadilah*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

*)Email corresponding author: srfadilah@unsri.ac.id

Received: 7 November 2025 Revised: 8 Agustus 2026 Accepted: 11 Agustus 2026

Abstract

Motorcycles are a dominant mode of urban mobility in many Southeast Asian cities because of their affordability, flexibility, and ability to maneuver through congested streets. However, their high share creates dense and heterogeneous traffic conditions, where conventional traffic control strategies may become less effective. This study develops a motorcycle-sensitive ramp metering strategy for urban road networks to regulate motorcycle entry onto the main road and reduce congestion. A multiobjective optimization framework based on the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is applied with two objectives: maximizing total vehicle travel distance and minimizing main-road occupancy. Traffic performance is evaluated using microscopic simulation on a grid-based urban network under mixed-traffic conditions, with motorcycle proportions ranging from 20% to 80%. The optimization results identify representative signal timings of 8.98 s for the red phase and 7.32 s for the green phase. The best performance is obtained when the motorcycle proportion on the main road is approximately 60% or lower, as this condition balances road-space utilization and travel efficiency. Above this level, the benefits decrease because of increased motorcycle accumulation on the ramp. These findings suggest that scenario-based ramp metering can support urban traffic management in motorcycle-dependent cities and rapidly growing Southeast Asian contexts.

Keywords: Traffic signal optimization, motorcycle ramp metering; NSGA-II; mixed traffic; urban traffic management

Abstrak

Sepeda motor merupakan moda dominan dalam mobilitas perkotaan di banyak kota di Asia Tenggara karena biaya penggunaannya yang rendah, fleksibilitas, dan kemampuan bermanuver di jalan padat. Namun, tingginya proporsi sepeda motor membentuk kondisi lalu lintas yang padat dan heterogen, sehingga strategi pengendalian konvensional sering kali kurang efektif. Penelitian ini mengembangkan strategi ramp metering yang mempertimbangkan karakteristik sepeda motor pada jaringan jalan perkotaan untuk mengatur arus masuk sepeda motor ke ruas utama dan mengurangi kemacetan. Optimasi multiobjektif dilakukan menggunakan Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) dengan dua tujuan, yaitu memaksimalkan total jarak tempuh kendaraan dan meminimalkan okupansi ruas utama. Kinerja lalu lintas dievaluasi melalui simulasi mikroskopik pada jaringan perkotaan berbentuk grid dalam kondisi lalu lintas campuran, dengan variasi proporsi sepeda motor sebesar 20% hingga 80%. Hasil optimasi menunjukkan waktu sinyal representatif sebesar 8,98 detik untuk fase merah dan 7,32 detik untuk fase hijau. Kinerja terbaik diperoleh ketika proporsi sepeda motor pada ruas utama sekitar 60% atau lebih rendah karena mampu menyeimbangkan pemanfaatan ruang jalan dan efisiensi perjalanan. Di atas tingkat tersebut, manfaat pengendalian menurun akibat meningkatnya akumulasi sepeda motor pada ramp. Temuan ini menunjukkan bahwa ramp metering berbasis skenario dapat mendukung manajemen lalu lintas perkotaan di kota yang didominasi sepeda motor.

Kata kunci: Optimasi sinyal lalu lintas, ramp metering, lalu lintas sepeda motor, NSGA-II, manajemen lalu lintas perkotaan

Pendahuluan

Sepeda motor merupakan salah satu moda utama dalam mobilitas perkotaan di berbagai negara Asia karena biaya penggunaannya yang relatif rendah, fleksibilitas perjalanan, serta kemampuannya bermanuver pada kondisi jalan yang padat. Tingginya proporsi sepeda motor membentuk arus lalu lintas campuran dengan karakteristik yang berbeda dari arus yang didominasi kendaraan roda empat. Perbedaan dimensi kendaraan, kemampuan akselerasi, pemilihan posisi lateral, dan pemanfaatan celah antarkendaraan menyebabkan penggunaan ruang jalan menjadi lebih dinamis dan tidak selalu mengikuti batas lajur secara ketat. Wong *et al.* (2016) menunjukkan bahwa proporsi sepeda motor yang tinggi memengaruhi pemilihan lajur, distribusi posisi lateral, serta jarak antarkendaraan pada jalan arteri perkotaan. Selain karakteristik pergerakannya, pengendara sepeda motor juga menunjukkan respons terhadap kondisi jaringan dan informasi perjalanan, termasuk kecenderungan untuk mengganti rute ketika alternatif perjalanan dinilai lebih menguntungkan (Fadilah *et al.*, 2024).

Heterogenitas kendaraan dan lemahnya disiplin lajur meningkatkan kompleksitas interaksi longitudinal dan lateral dalam arus lalu lintas. Pada kondisi tersebut, satu kendaraan dapat merespons lebih dari satu kendaraan di depannya, sementara posisi pemimpin dan pengikut tidak selalu berada pada satu garis lajur yang sama. Kondisi ini membatasi kemampuan model lalu lintas konvensional yang dikembangkan berdasarkan asumsi arus homogen dan pergerakan berbasis lajur. Papathanasopoulou dan Antoniou (2018) menjelaskan bahwa pemodelan lalu lintas heterogen memerlukan representasi yang mampu menangkap pergerakan longitudinal dan lateral secara bersamaan. Hawkins dan Kattan (2018) juga menunjukkan perlunya pendekatan simulasi yang secara eksplisit mengakomodasi perbedaan dimensi kendaraan serta penggunaan ruang jalan yang tidak sepenuhnya berbasis lajur. Sementara itu, Gaddam dan Rao (2019) menemukan bahwa hubungan kecepatan-kepadatan pada lalu lintas heterogen dipengaruhi oleh komposisi dan karakteristik fisik kendaraan, sehingga ukuran kepadatan berbasis jumlah kendaraan saja belum tentu menggambarkan pemanfaatan ruang jalan secara memadai.

Karakteristik tersebut juga memengaruhi operasi lalu lintas pada pendekat persimpangan dan area penggabungan. Sepeda motor dapat bergerak menuju bagian depan antrean, berpindah posisi lateral, dan memanfaatkan ruang sempit di antara kendaraan yang lebih besar. Ahmed *et al.* (2021) memperlihatkan adanya fenomena *queue jumping*

oleh sepeda motor dalam arus heterogen pada persimpangan bersinyal, sedangkan Mardiaty *et al.* (2021) menunjukkan perlunya suatu pemodelan keputusan manuver yang khusus merepresentasikan perilaku kendaraan roda dua pada lingkungan perkotaan. Selain memengaruhi pola antrean dan pelepasan kendaraan, perubahan proporsi sepeda motor juga dapat menghasilkan tingkat risiko yang berbeda menurut tipe jalan dan karakteristik lingkungan lalu lintas (Junirman & Oneyama, 2024). Oleh karena itu, proporsi sepeda motor perlu dimasukkan secara eksplisit dalam perancangan dan evaluasi strategi pengendalian lalu lintas.

Salah satu bentuk pengendalian lalu lintas yang dapat diterapkan adalah pengaturan waktu sinyal. Pada kondisi heterogen, konfigurasi sinyal perlu mempertimbangkan perbedaan karakteristik kendaraan, pemanfaatan ruang jalan, serta pola antrean yang tidak sepenuhnya mengikuti disiplin lajur. Verma *et al.* (2018) menunjukkan bahwa optimasi waktu sinyal yang mempertimbangkan karakteristik lalu lintas heterogen dapat memberikan hasil yang berbeda dibandingkan formulasi untuk lalu lintas homogen. Dalam konteks pengaturan kendaraan yang memasuki ruas utama, *ramp metering* menggunakan sinyal untuk membatasi dan mengatur laju arus masuk agar proses penggabungan tidak menimbulkan gangguan berlebihan pada arus utama. Pengaturan tersebut pada umumnya ditujukan untuk mempertahankan operasi ruas utama di sekitar kondisi yang diinginkan, memecah pelepasan kelompok kendaraan dari jalur masuk, dan mengurangi kemungkinan penurunan kapasitas di area penggabungan (Federal Highway Administration [FHWA], 2014).

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja dengan *ramp metering*. Ghanbarteherani *et al.* (2020) mengembangkan pengendalian berbasis *machine learning* yang menggunakan data arus, kecepatan, okupansi, dan data historis untuk menentukan pengaturan sinyal secara responsif. Wei *et al.* (2021) menerapkan kombinasi *particle swarm optimization* dan pengendali PID untuk mengatur arus masuk pada jalan bebas hambatan. Nagalur Subraveti *et al.* (2021) menggabungkan pengendalian perpindahan lajur dengan *ramp metering* dalam rangka menyeimbangkan distribusi tundaan antara arus utama dan kendaraan pada jalur masuk.

Pendekatan optimasi dinamis juga dikembangkan oleh Gu *et al.* (2022), sedangkan Tajdari *et al.* (2022) mengintegrasikan *ramp metering* dengan pengendalian perpindahan lajur pada lingkungan kendaraan terhubung dan otomatis. Penelitian lain menekankan pentingnya mengendalikan panjang

antrean dan waktu tunggu pada jalur masuk (Daines *et al.*, 2022) serta mengevaluasi efisiensi dan keselamatan pada area konvergensi ramp dalam arus campuran (Yu *et al.*, 2022).

Meskipun menunjukkan perkembangan metode yang luas, studi-studi tersebut umumnya berfokus pada jalan bebas hambatan dengan arus yang didominasi kendaraan roda empat, lingkungan berbasis lajur, atau skenario kendaraan terhubung dan otomatis. Tujuan pengendaliannya juga banyak diarahkan pada pemeliharaan kepadatan kritis, peningkatan *throughput*, pengendalian antrean, atau pengurangan tundaan pada koridor jalan bebas hambatan.

Dengan demikian, masih diperlukan kajian mengenai penerapan konsep *ramp metering* pada jaringan jalan perkotaan dengan interaksi lalu lintas heterogen dan proporsi sepeda motor yang tinggi. Penyesuaian diperlukan karena ukuran kendaraan yang lebih kecil dapat menurunkan okupansi ruang untuk jumlah kendaraan tertentu, tetapi peningkatan arus sepeda motor pada jalur masuk juga dapat menimbulkan akumulasi antrean dan interaksi penggabungan yang lebih intens.

Keseimbangan antara kelancaran ruas utama dan pelepasan kendaraan dari jalur masuk perlu dievaluasi secara bersamaan, bukan melalui satu indikator kinerja saja. Permasalahan tersebut membentuk optimasi multiobjektif karena peningkatan pelepasan kendaraan dari jalur masuk dapat meningkatkan mobilitas jaringan, tetapi pada saat yang sama berpotensi menaikkan okupansi ruas utama. Sebaliknya, pembatasan arus masuk yang terlalu ketat dapat menjaga okupansi ruas utama tetap rendah, tetapi meningkatkan antrean dan mengurangi jarak tempuh kendaraan dalam jaringan. *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) sesuai digunakan untuk permasalahan tersebut karena menghasilkan himpunan solusi nondominan yang dapat merepresentasikan kompromi antarfungsi tujuan melalui mekanisme elitisme, pengurutan berdasarkan nondominasi, dan *crowding distance* (Deb *et al.*, 2002). Penerapan NSGA-II pada optimasi pengaturan lalu lintas juga menunjukkan kemampuannya menyeimbangkan indikator kinerja yang saling bertentangan (Al-Turki *et al.*, 2020).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan pengaturan sinyal *ramp metering* yang mempertimbangkan karakteristik sepeda motor pada jaringan jalan perkotaan. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan optimasi multiobjektif untuk menentukan konfigurasi durasi fase hijau dan merah pada jalur masuk khusus sepeda motor dengan variasi proporsi sepeda motor

sebesar 20%, 40%, 60%, dan 80%. Dua fungsi tujuan digunakan secara bersamaan, yaitu memaksimalkan total jarak tempuh kendaraan sebagai indikator mobilitas jaringan dan meminimalkan okupansi area pada ruas utama sebagai indikator pemanfaatan ruang jalan. Penelitian ini bertujuan menentukan konfigurasi sinyal *ramp metering* menggunakan NSGA-II dan menganalisis *trade-off* antara total jarak tempuh kendaraan dan okupansi ruas utama pada berbagai proporsi sepeda motor.

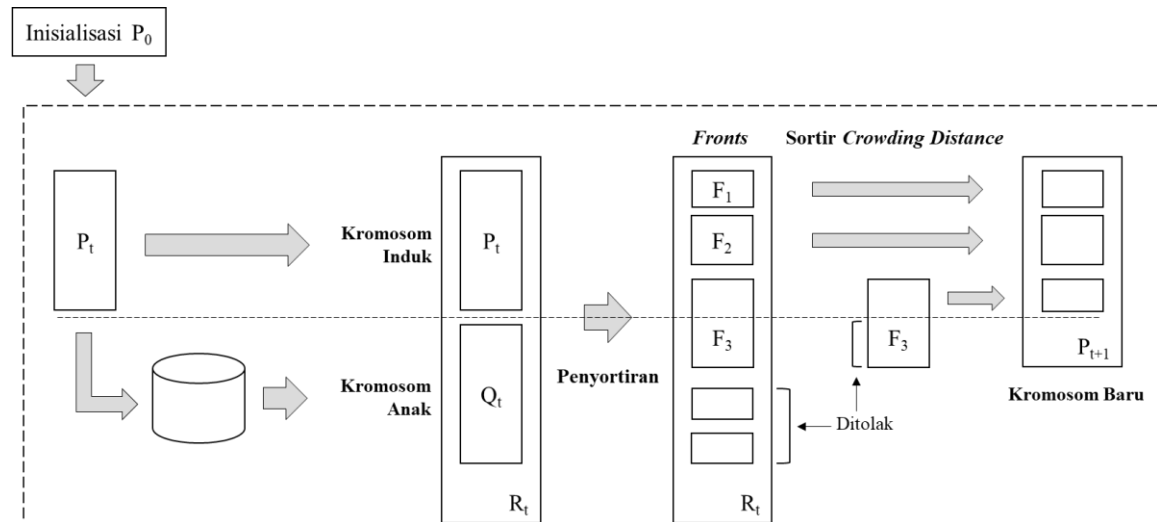
Metodologi Penelitian

Bagian ini menjelaskan kerangka kerja penelitian, studi kasus yang digunakan, formulasi fungsi tujuan, serta algoritma optimasi yang diterapkan untuk mencapai tujuan penelitian.

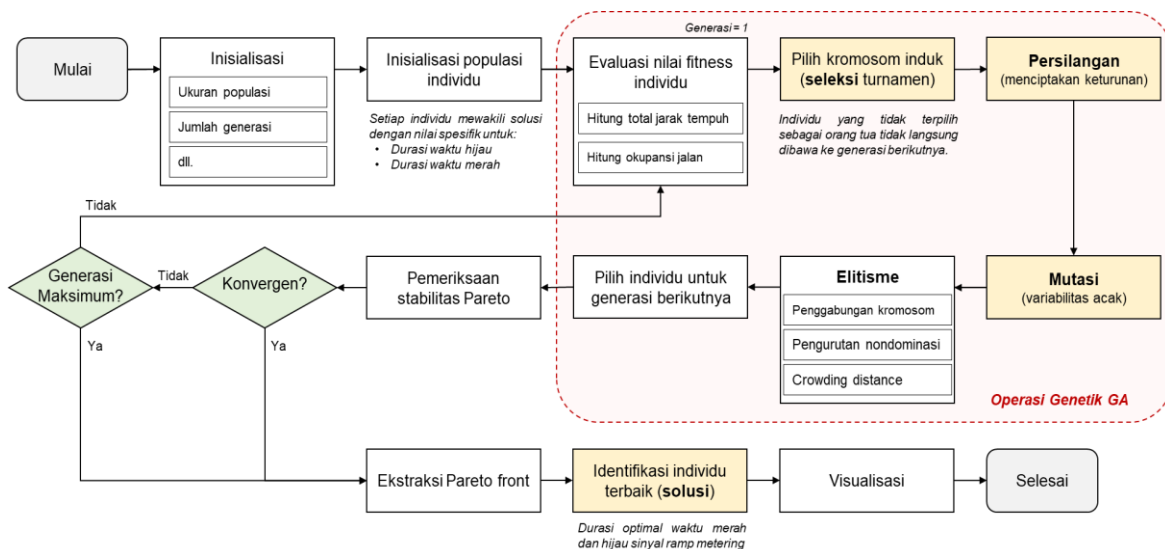
Kerangka kerja penelitian

Algoritma NSGA-II beroperasi secara stokastik melalui siklus iteratif untuk mengembangkan populasi individu yang semakin mendekati solusi optimal. Individu dengan tingkat kecocokan (*fitness*) terbaik akan membentuk himpunan solusi Pareto. Alur kerja NSGA-II secara umum, pada Gambar 1, memperlihatkan tahapan utama dalam proses optimasi yang dirancang untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi konvergensi dan keragaman solusi. Pada studi ini, NSGA-II diimplementasikan untuk mengoptimalkan sinyal pengaturan lajur masuk (*ramp metering*) khusus bagi sepeda motor pada jaringan lalu lintas dengan komposisi kendaraan heterogen. Diagram alir proses ditampilkan pada Gambar 2.

Proses diawali dengan tahap inisialisasi, di mana populasi awal dari solusi potensial, atau disebut individu, dibangkitkan secara acak berdasarkan parameter seperti ukuran populasi dan jumlah iterasi generasi. Tahap ini penting untuk memastikan keberagaman solusi awal dalam ruang pencarian, sehingga memperbesar peluang algoritma menemukan kombinasi optimal tanpa bias terhadap konfigurasi awal tertentu. Setiap individu kemudian dievaluasi untuk memperoleh nilai *fitness* yang mewakili kemampuan solusi dalam mencapai dua tujuan optimasi, yaitu meminimalkan tingkat okupansi jalan dan memaksimalkan total jarak tempuh kendaraan. Setelah evaluasi awal, NSGA-II menjalankan operasi genetik secara iteratif untuk meningkatkan kualitas populasi pada setiap generasi. Seleksi dilakukan dengan metode *tournament selection*, yang dipilih karena efisiensi dan kemampuannya mempertahankan tekanan seleksi yang memadai (Rawat *et al.*, 2022) di setiap generasi berdasarkan nilai *fitness*.



Gambar 1. Diagram alir proses algoritma NSGA-II.



Gambar 2. Bagan alir algoritma NSGA-II untuk optimasi sinyal ramp metering.

Mekanisme ini melibatkan pemilihan acak sejumlah individu dari populasi, dengan memanfaatkan metode roda *roulette* stokastik, dan penentuan pemenang berdasarkan kinerja relatif mereka (Jebari, 2013). Umumnya, ukuran turnamen dua (*binary tournament*) dipilih karena memberikan keseimbangan antara kesederhanaan dan efektivitas (Tan *et al.*, 2008).

Ukuran turnamen yang lebih besar digunakan untuk meningkatkan tekanan seleksi dan memperluas keragaman genetik populasi, yang pada akhirnya mampu meningkatkan potensi keberhasilan GA. Individu terbaik dari generasi sebelumnya dipertahankan melalui mekanisme elitisme (selanjutnya dikenal sebagai solusi elit), memastikan bahwa solusi terbaik tidak hilang di generasi berikutnya (Deb *et al.*, 2002). Proses seleksi ini sangat penting dalam menentukan gen mana yang akan berpartisipasi dalam reproduksi

dan menghasilkan solusi atau keturunan baru (Katoch *et al.*, 2021).

Operasi genetik dalam GA terdiri atas dua tahap utama, yaitu *crossover* (persilangan) dan *mutation* (mutasi). *Crossover* berfungsi menggabungkan elemen genetik dari dua individu terpilih untuk membentuk keturunan baru yang memiliki karakteristik gabungan dari keduanya. Teknik ini menciptakan keturunan dengan karakteristik baru, yang memungkinkan GA terus meningkatkan dan menyempurnakan solusi dari satu generasi ke generasi berikutnya. Dalam studi ini digunakan *multi-point crossover* guna menciptakan kombinasi genetik yang lebih kompleks, memperluas eksplorasi ruang pencarian, dan mencegah konvergensi prematur pada solusi suboptimal dengan menjaga keseimbangan antara eksplorasi kandidat solusi baru dan eksploitasi solusi yang ada (DeJong & Spears, 2006).

Sementara itu, mutasi memperkenalkan variasi acak ke dalam kromosom untuk menjaga keragaman genetik, sekaligus mendorong eksplorasi berbagai kemungkinan solusi dan menghindari jebakan pada solusi optimum lokal (Katoch *et al.*, 2021). Strategi mutasi yang digunakan bersifat tidak seragam (*non-uniform mutation*), di mana laju mutasi menurun seiring bertambahnya generasi, sehingga proses awal lebih berfokus pada eksplorasi dan tahap akhir pada eksploitasi solusi yang menjanjikan.

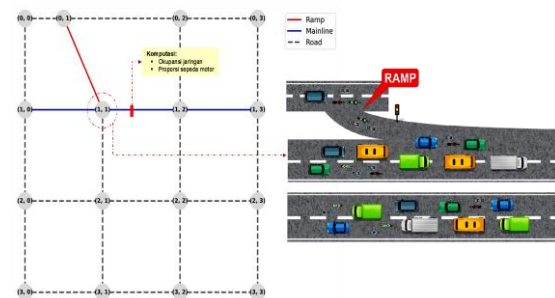
Hasil dari proses *crossover* dan *mutasi* kemudian digabungkan dengan individu elit dari populasi sebelumnya. Populasi gabungan ini diurutkan menggunakan metode *fast non-dominated sorting* untuk membentuk lapisan Pareto berdasarkan tingkat dominasi. Solusi yang tidak didominasi akan ditempatkan pada lapisan teratas. Selanjutnya, nilai *crowding distance* dihitung untuk menjaga penyebaran solusi pada Pareto front. Proses ini berlangsung secara iteratif hingga kriteria penghentian terpenuhi, baik berdasarkan jumlah maksimum generasi maupun stabilitas *Pareto front*. Himpunan solusi Pareto akhir kemudian diambil sebagai kumpulan solusi optimal yang memenuhi tujuan penelitian.

Studi kasus

Penelitian ini menggunakan studi kasus pada penerapan sistem *ramp metering* di kawasan perkotaan yang didominasi oleh sepeda motor. Simulasi dilakukan pada jaringan *grid* berukuran 3×3 , dengan setiap segmen memiliki panjang 500 meter dan lebar lajur 3,5 meter, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3(a). Desain jaringan ini merepresentasikan kondisi di Distrik Ninh Kiều, Kota Cần Thơ, Vietnam (lihat Gambar 3(b)). Fokus utama penelitian adalah penerapan jalur masuk (*on-ramp*) yang mengatur aliran sepeda motor

sebelum bergabung dengan jalan utama, untuk meningkatkan kelancaran arus lalu lintas.

Penelitian ini memanfaatkan data sekunder dari dua survei, yaitu survei volume lalu lintas (23–25 Februari 2020) dan survei kegiatan harian (*activity diary survey*) (17–23 Februari 2020). Hasil analisis menunjukkan bahwa sepeda motor mendominasi sekitar 88,9% dari total volume lalu lintas, menunjukkan peran sentral moda ini dalam sistem transportasi kawasan. Berdasarkan survei kecepatan, diperoleh rata-rata 40 km/jam (SD = 5 km/jam) untuk sepeda motor dan 25 km/jam (SD = 2,5 km/jam) untuk mobil.



(a)



(b)

Gambar 3. Struktur jaringan jalan di Ninh Kiều: (a) desain simulasi, (b) kondisi aktual



Gambar 4. Distribusi volume lalu lintas di Wilayah Ninh Kiều

Tabel 1. Pseudocode: NSGA-II optimasi sinyal ramp metering

No	Pseudocode
1	Inisialisasi simulasi: Tetapkan parameter (ukuran populasi, jumlah generasi, probabilitas <i>crossover</i> dan mutasi, batas waktu siklus), serta definisikan geometri jaringan jalan, arus lalu lintas, komposisi kendaraan, jarak dan ruang aman kendaraan.
2	Inisialisasi populasi: Bangkitkan individu secara acak berupa kombinasi waktu hijau dan merah dalam batas yang diizinkan, dengan syarat ($g + r = cycle$).
3	Evaluasi <i>fitness</i> : Untuk setiap individu, lakukan simulasi lalu lintas dan hitung nilai objektif berupa total jarak tempuh kendaraan (<i>TVKT</i>) dan okupansi jalan (<i>OCC</i>).
4	Operasi genetika: Lakukan seleksi menggunakan metode turnamen, kemudian terapkan <i>crossover</i> dan mutasi <i>non-uniform</i> untuk menghasilkan keturunan.
5	Evolusi populasi: <i>for</i> setiap generasi <i>do</i> <div style="margin-left: 40px;">Evaluasi seluruh individu → hitung (f_1, f_2); gabungkan populasi induk dan keturunan;</div> <div style="margin-left: 40px;">Urutkan berdasarkan nondominasi dan <i>crowding distance</i>;</div> <div style="margin-left: 40px;">Terapkan elitisme untuk membentuk populasi berikutnya.</div> <div style="margin-left: 40px;">Periksa konvergensi berdasarkan stabilitas Pareto front dan indikator peningkatan.</div> <div style="margin-left: 40px;"><i>end for</i></div>
6	Keluaran: Kombinasi optimal waktu hijau–merah sinyal <i>ramp metering</i> yang menghasilkan Pareto front terbaik berdasarkan objektif <i>TVKT</i> dan <i>OCC</i> .

Distribusi volume lalu lintas per jam di Ninh Kiều ditampilkan pada Gambar 4. Puncak arus terjadi sekitar pukul 08.00, bertepatan dengan waktu keberangkatan mayoritas pekerja (61,2%) dan pelajar (60,6%) menuju sekolah atau universitas. Volume tertinggi tercatat di ruas Nguyễn Văn Linh, dengan 3.778 sepeda motor dan 324 mobil per jam pada jam sibuk. Berdasarkan karakteristik tersebut,

ruas ini dipilih sebagai lokasi penerapan skenario *ramp metering* khusus sepeda motor.

Fungsi tujuan

Optimasi sinyal *ramp metering* dilakukan dengan menggunakan NSGA-II untuk mencari kombinasi durasi fase hijau dan merah yang optimal dengan dua fungsi tujuan utama.

Fungsi pertama berikut ini, yaitu memaksimalkan total jarak tempuh kendaraan (f_{jarak}), bertujuan untuk meningkatkan mobilitas dan *throughput* jaringan, serta mengurangi waktu perjalanan:

$$maks\{f_{jarak}(G, R)\} = \sum_{t=1}^T \sum_{k \in K} d_{k,t} \quad (1)$$

dengan G dan R masing-masing adalah durasi fase hijau dan merah, serta $d_{k,t}$ adalah jarak tempuh kendaraan jenis k pada waktu t .

Fungsi kedua di bawah ini, yaitu meminimalkan okupansi kapasitas jalan utama (f_{ρ_A}), bertujuan mengurangi kepadatan pada ruas hilir *ramp* guna menjaga kelancaran arus lalu lintas:

$$min\{f_{\rho_A}(G, R)\} = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_k V_k A_k}{A_i} 100\% \quad (2)$$

di mana V_k adalah volume kendaraan jenis k , A_k adalah luas area kendaraan k , dan A_i adalah luas segmen jalan i .

Dengan demikian, algoritma NSGA-II berperan dalam menyeimbangkan dua tujuan yang saling bertentangan, yaitu peningkatan mobilitas dan pengendalian kepadatan, untuk mencapai konfigurasi sinyal *ramp metering* yang paling efisien. Durasi fase hijau dan merah disesuaikan oleh algoritma NSGA-II untuk mencapai keseimbangan optimal antara kedua tujuan ini.

Algoritma

Pseudocode pada Tabel 1 menggambarkan proses simulasi dan optimasi sinyal *ramp metering* menggunakan algoritma NSGA-II berdasarkan jaringan *grid* yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Hasil dan Pembahasan

Subbab ini membahas hasil optimasi konfigurasi sinyal *ramp metering* yang dirancang untuk mengatur laju masuk sepeda motor dari jalan akses menuju arteri utama pada kondisi lalu lintas campuran. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja algoritma NSGA-II dalam mencapai keseimbangan antara peningkatan efisiensi pergerakan kendaraan dan pengendalian kepadatan lalu lintas pada jalur utama.

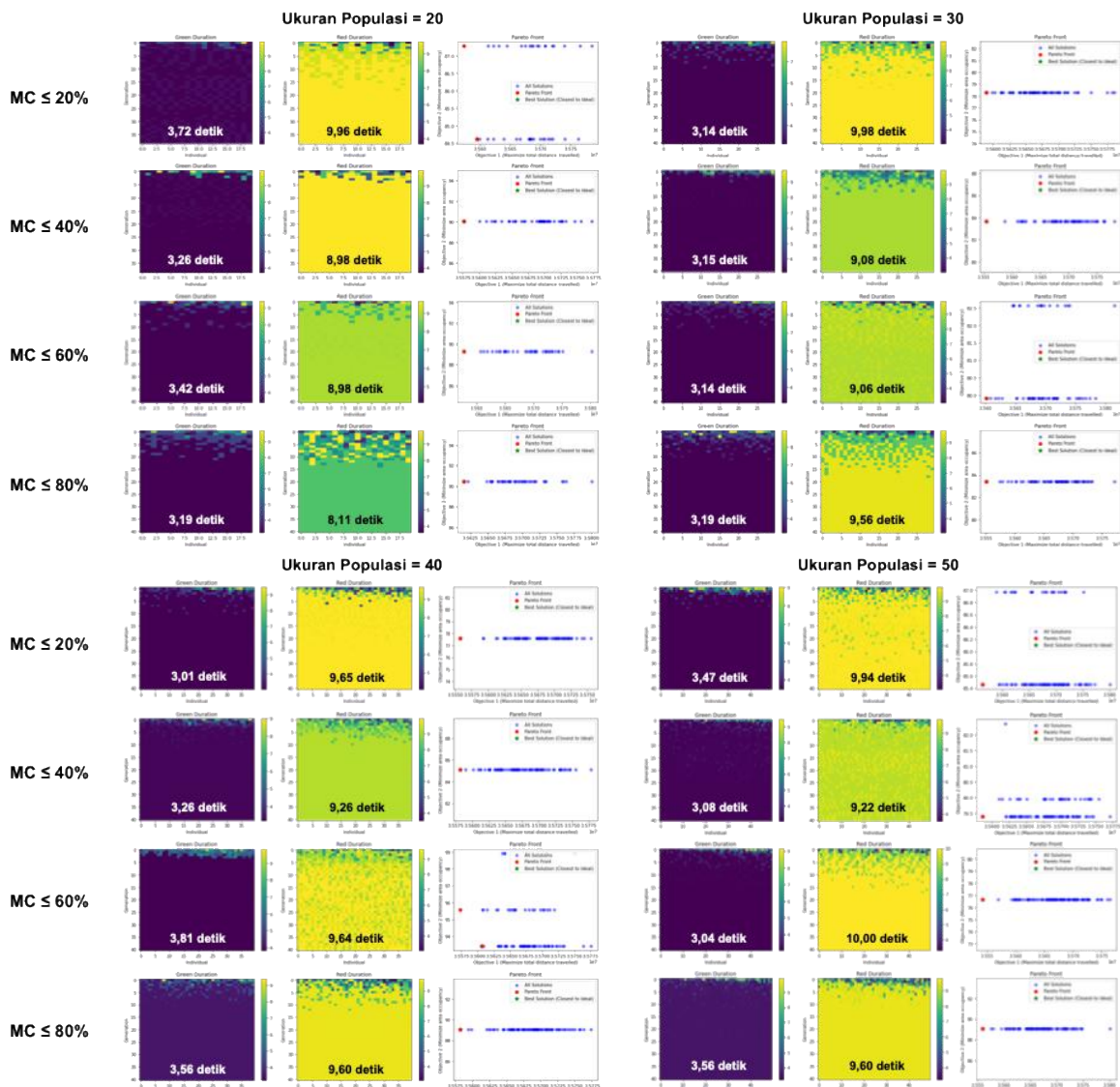
Kinerja optimasi sinyal *ramp metering*

Studi ini menerapkan algoritma NSGA-II untuk mengoptimalkan durasi fase hijau dan merah pada sistem *ramp metering* khusus sepeda motor dengan dua tujuan utama. Simulasi berlangsung selama 3.600 detik dengan time-step simulasi sebesar 5 detik, mencerminkan karakteristik operasi *ramp metering* aktual yang hanya menggunakan dua fase sinyal untuk mengatur pelepasan kendaraan sesuai praktik di lapangan. Parameter durasi hijau–merah hasil optimasi NSGA-II dipertahankan konstan selama satu run simulasi untuk setiap skenario proporsi sepeda motor; studi ini tidak menerapkan pembaruan sinyal berbasis umpan balik secara *real-time* (FHWA, 2014).

Empat skenario komposisi sepeda motor pada arus utama diuji, yaitu 20%, 40%, 60%, dan 80%, serta

empat variasi ukuran populasi algoritma genetika (20, 30, 40, dan 50 individu). Parameter evolusi meliputi 40 generasi, probabilitas mutasi 0,3 dengan *decay rate* 0,01, dan ukuran turnamen seleksi sebesar 5. Hasil optimasi, yang ditunjukkan pada Gambar 5, menunjukkan bahwa ukuran populasi memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas pencarian solusi dan kualitas konfigurasi sinyal yang dihasilkan.

Secara umum, ukuran populasi 30 individu menunjukkan performa paling konsisten dalam menjaga keseimbangan antara proses eksplorasi (kemampuan menjangkau berbagai kombinasi durasi sinyal) dan eksploitasi ruang pencarian (kemampuan memusatkan pencarian di sekitar solusi optimal), dengan pola konvergensi yang stabil dan waktu komputasi yang efisien.



Gambar 5. Distribusi solusi NSGA-II untuk optimasi sinyal *ramp metering* pada berbagai proporsi sepeda motor dan ukuran populasi

Sebaliknya, ukuran populasi kecil (20 individu) menghasilkan variasi solusi yang lebih besar dan kecenderungan terjebak pada solusi suboptimal, sedangkan populasi besar (40 dan 50 individu) memang memberikan keragaman solusi yang lebih luas, namun tidak disertai dengan peningkatan kualitas yang signifikan serta membutuhkan sumber daya komputasi lebih tinggi. Pola ini konsisten dengan Al-Turki *et al.* (2020), yang melaporkan bahwa ukuran populasi yang terlalu besar dapat mengurangi efisiensi proses optimasi pada jaringan lalu lintas kompleks.

Visualisasi hasil pada *heatmap* dan sebaran solusi Pareto menunjukkan bahwa konfigurasi sinyal merah stabil pada sekitar $\pm 8,9$ detik untuk hampir seluruh skenario. Namun, ketika proporsi sepeda motor mencapai 80%, durasi merah menurun hingga sekitar 8,11 detik, hal ini mencerminkan konfigurasi optimum yang berbeda pada skenario proporsi sepeda motor yang lebih tinggi, sehingga kebutuhan pengaturan pelepasan arus masuk dapat tetap terlayani. Sementara itu, durasi fase hijau tampak lebih bervariasi dan cenderung menurun seiring meningkatnya dominasi sepeda motor, yang menggambarkan penyesuaian pelepasan kendaraan agar tidak menyebabkan peningkatan kepadatan di ruas utama. Konsistensi dan kestabilan konfigurasi sinyal yang diperoleh dari proses optimasi tersebut dapat diamati lebih jelas pada Gambar 6, yang menampilkan *boxplot* distribusi durasi fase hijau dan merah untuk berbagai ukuran populasi.

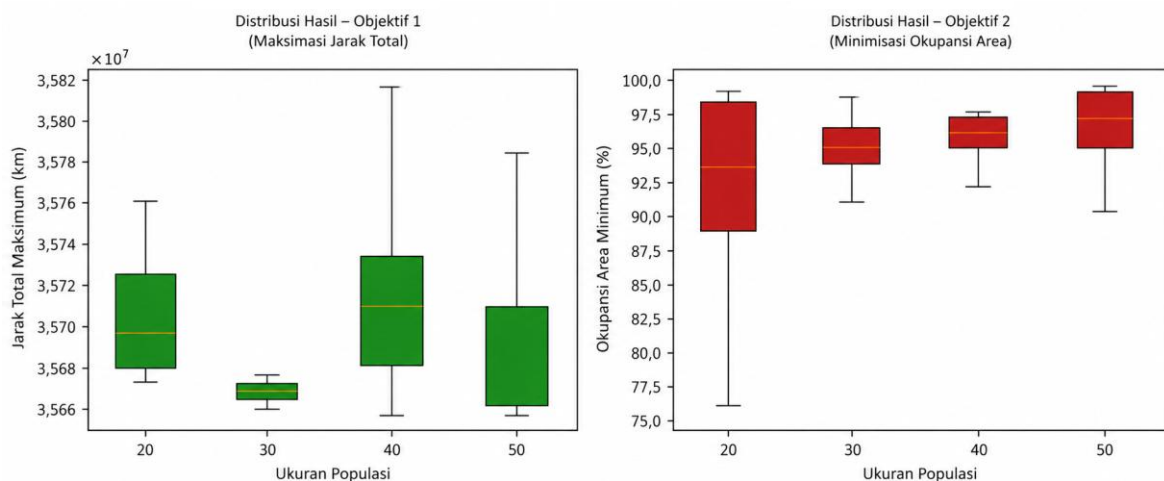
Pola distribusi yang lebih rapat serta variabilitas yang lebih rendah pada ukuran populasi 30 menegaskan bahwa parameter ini memberikan keseimbangan terbaik antara eksplorasi dan

eksploitasi dalam proses evolusi. Sebaliknya, ukuran populasi yang lebih kecil menunjukkan fluktuasi lebih besar dan potensi terjebak pada solusi suboptimal, sementara ukuran populasi yang lebih besar meningkatkan beban komputasi tanpa perbaikan kualitas solusi yang signifikan. Dengan demikian, populasi 30 dianggap paling stabil dan efektif dalam mencapai konfigurasi sinyal *ramp metering* yang optimal dalam hal ini.

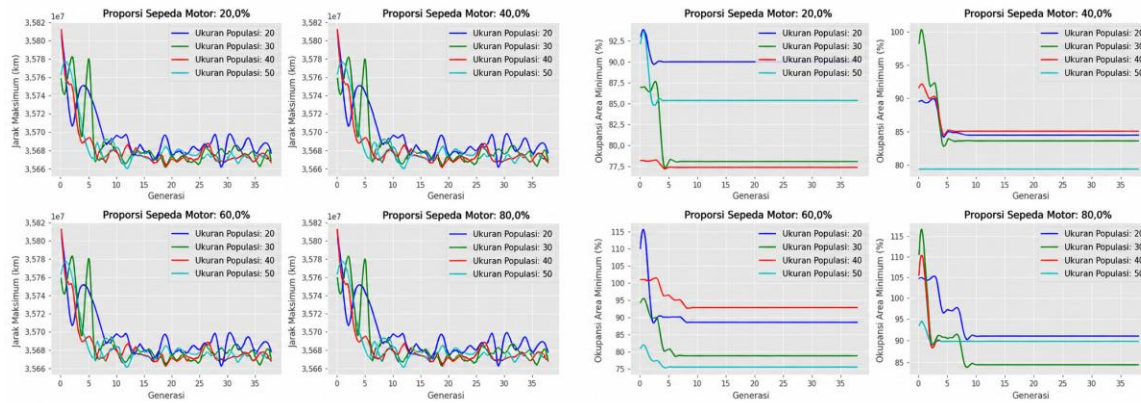
Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan efektivitas NSGA-II dalam mengelola *trade-off* antara kelancaran arus utama dan efisiensi pelepasan kendaraan melalui *ramp metering* pada kondisi lalu lintas campuran yang didominasi sepeda motor. Penentuan ukuran populasi yang tepat menjadi faktor kunci keberhasilan optimasi, dengan populasi 30 terbukti memberikan performa optimal pada seluruh skenario.

Evaluasi nilai *fitness*

Evaluasi nilai *fitness* merupakan tahap krusial dalam proses optimasi multiobjektif dengan NSGA-II, terutama ketika tujuan yang dioptimasi bersifat saling bertentangan. Dalam studi ini, nilai *fitness* dihitung berdasarkan dua ukuran kinerja, yaitu (1) total jarak tempuh kendaraan sebagai indikator mobilitas dan *throughput* jaringan, serta (2) okupansi area pada ruas utama sebagai indikator tingkat kepadatan lalu lintas. Dengan demikian, fungsi evaluasi bertujuan menghasilkan *Pareto front* yang menggambarkan keseimbangan optimal antara peningkatan efisiensi perjalanan dan pengendalian kemacetan, tanpa mengorbankan salah satu objektif secara berlebihan (solusi nondominan).



Gambar 6. *Boxplot* durasi fase hijau (kiri) dan merah (kanan) untuk berbagai ukuran populasi



Gambar 7. Evolusi nilai *fitness* berdasarkan jarak tempuh (kiri) dan okupansi (kanan) untuk berbagai proporsi sepeda motor dan ukuran populasi

Gambar 7 menampilkan evolusi nilai *fitness* selama proses iterasi untuk empat skenario proporsi sepeda motor pada arus lalu lintas (20%, 40%, 60%, dan 80%) dengan variasi ukuran populasi (20, 30, 40, dan 50). Secara umum, seluruh skenario menunjukkan pola konvergensi menuju nilai *fitness* yang stabil seiring bertambahnya generasi, menandakan kemampuan algoritma untuk mencapai kestabilan dalam pencarian solusi optimal.

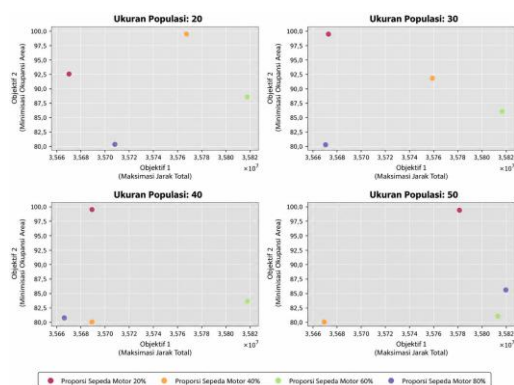
Ukuran populasi 30 menunjukkan kinerja paling seimbang di seluruh skenario. Pada generasi akhir, grafik memperlihatkan variasi yang relatif kecil untuk jarak tempuh dan okupansi, sementara keragaman solusi tetap terjaga. Dibandingkan dengan populasi 20, konfigurasi ini menunjukkan kestabilan konvergensi yang lebih baik; dibandingkan dengan populasi 40 dan 50, jumlah kandidat yang dievaluasi juga lebih sedikit. Perubahan proporsi sepeda motor menghasilkan konfigurasi sinyal dan tingkat okupansi yang berbeda antarskenario. Pada proporsi rendah (20%–40%), okupansi cenderung berada pada tingkat lebih rendah. Sedangkan pada proporsi tinggi (60%–80%), konfigurasi fase hijau–merah berubah lebih agresif untuk mempertahankan kelancaran arus lalu lintas, yang tercermin dari penurunan durasi *ramp delay* dan stabilisasi okupansi pada level yang lebih tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa *ramp metering* berbasis NSGA-II mampu beradaptasi terhadap dinamika kepadatan lalu lintas didominasi sepeda motor.

Secara keseluruhan, temuan ini mengonfirmasi bahwa mekanisme seleksi, *crossover*, mutasi, dan elitisme dalam NSGA-II bekerja efektif dalam menghasilkan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi, sekaligus mempertahankan keragaman solusi sepanjang iterasi. Keberhasilan ini menjadi indikasi kuat bahwa pendekatan optimasi multiobjektif layak diterapkan pada sistem kontrol

Hasil menunjukkan bahwa ukuran populasi memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika konvergensi. Ukuran populasi 20 menunjukkan kecenderungan fluktuasi nilai *fitness* yang lebih tinggi, mencerminkan proses eksplorasi yang agresif namun dengan stabilitas yang lebih rendah dan risiko terperangkap pada optimum lokal yang lebih tinggi. Sebaliknya, populasi besar (40 dan 50) memperlihatkan stabilisasi yang lebih cepat dan keragaman solusi yang lebih luas, namun dengan konsekuensi peningkatan waktu komputasi. lalu lintas di kawasan perkotaan dengan proporsi kendaraan roda dua yang tinggi.

Optimasi Pareto pada lalu lintas campuran: Pengaruh proporsi sepeda motor

Sepeda motor dan kendaraan lainnya berinteraksi dalam ruang jalan yang sama, sehingga dinamika pergerakan dan kapasitas ruas jalan sangat dipengaruhi oleh komposisi moda. Untuk itu, studi ini juga menganalisis peran proporsi sepeda motor terhadap kinerja jaringan ketika *ramp metering* diterapkan. Evaluasi didasarkan pada himpunan solusi Pareto terbaik dari hasil optimasi NSGA-II sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil analisis pareto untuk pengaruh proporsi sepeda motor

Secara umum, terlihat bahwa peningkatan proporsi sepeda motor cenderung menurunkan tingkat okupansi ruas jalan utama, sejalan dengan ukuran fisik sepeda motor yang lebih kecil dan kemampuan manuver yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan roda empat. Meskipun kepadatan berkurang, kondisi tersebut tidak selalu menghasilkan peningkatan jarak tempuh secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa dominasi sepeda motor yang terlalu tinggi tidak otomatis berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi pergerakan lalu lintas.

Sebaliknya, pada proporsi sepeda motor yang relatif lebih rendah, okupansi jalan memang meningkat, namun tidak selalu memberikan keuntungan terhadap kelancaran arus. Analisis menunjukkan bahwa proporsi sepeda motor hingga sekitar 60% merupakan titik keseimbangan yang memberikan hasil optimasi paling konsisten, ditandai dengan peningkatan jarak tempuh sekaligus penurunan tingkat okupansi. Di atas ambang tersebut, manfaat *ramp metering* mulai menurun, mengindikasikan bahwa sistem menjadi kurang efektif dalam mengatur masuknya kendaraan ke ruas utama ketika dominasi sepeda motor terlalu tinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan komposisi moda dalam perancangan strategi manajemen lalu lintas. NSGA-II terbukti mampu mengidentifikasi konfigurasi sinyal *ramp metering* yang optimal dalam berbagai kondisi komposisi sepeda motor, sehingga dapat menjadi pendekatan yang efektif bagi perencana dan pengambil kebijakan dalam merumuskan pengendalian lalu lintas berbasis optimasi yang mempertimbangkan variasi komposisi sepeda motor.

Interpretasi hasil: Skema *ramp metering*

Hasil optimasi menunjukkan bahwa NSGA-II mampu mengidentifikasi parameter durasi fase hijau dan merah yang optimal pada setiap skenario komposisi sepeda motor. Pada penelitian ini, durasi sinyal dipertahankan konstan selama satu run simulasi untuk suatu skenario tertentu dan tidak diperbarui secara umpan balik (*feedback*) *real-time* selama simulasi berlangsung. Oleh karena itu, 'penyesuaian' yang dibahas pada bagian ini merujuk pada perbedaan parameter optimum antarskenario (misalnya MC 20%, 40%, 60%, dan 80%). Konfigurasi durasi sinyal hasil optimasi menghasilkan pola pelepasan kendaraan yang periodik dan stabil pada titik *ramp metering*. Pola ini mencerminkan keseimbangan antara kebutuhan pengendalian arus masuk dari jalur ramp dan upaya menjaga kelancaran arus utama pada ruas hilir. Meskipun parameter sinyal tidak berubah selama simulasi berlangsung, kombinasi durasi hijau dan merah yang berbeda antarskenario menghasilkan

karakteristik pelepasan kendaraan yang secara fungsional sesuai dengan tingkat kejenuhan lalu lintas pada masing-masing kondisi komposisi sepeda motor.

Pada kondisi lalu lintas campuran dengan proporsi sepeda motor di bawah 60%, konfigurasi optimum menunjukkan pola operasi yang menyerupai strategi *one-vehicle-per-green*. Dalam skema ini, fase hijau berdurasi sekitar 7,3 detik memungkinkan pelepasan 1–2 sepeda motor per siklus, sementara fase merah sepanjang sekitar 8,9 detik berfungsi sebagai interval pemulihan (*recovery interval*) bagi arus utama. Rasio pelepasan kendaraan yang dihasilkan berada pada kisaran 0,11–0,13 kendaraan per detik, yang menciptakan *headway* antarsepeda motor sekitar 0,7–0,9 detik. Nilai ini relatif memadai untuk menjaga jarak antarkendaraan dan mengurangi potensi gangguan turbulensi pada area penggabungan (*merging area*).

Pada skenario dengan dominasi sepeda motor yang lebih tinggi, yaitu hingga 80% dari total volume lalu lintas, hasil optimasi menunjukkan konfigurasi durasi sinyal yang berbeda, dengan fase merah yang relatif lebih pendek (sekitar 8,1 detik) dan laju pelepasan yang meningkat hingga sekitar 0,15 kendaraan per detik. Konfigurasi ini mencerminkan kebutuhan untuk mengakomodasi tekanan arus yang lebih besar pada jalur *ramp*, namun juga berimplikasi pada meningkatnya intensitas interaksi lateral di ruas utama. Meskipun demikian, pola pelepasan kendaraan tetap bersifat periodik dengan *offset* antar-siklus yang relatif konstan, yang menunjukkan bahwa konfigurasi sinyal hasil optimasi masih mampu menjaga kestabilan operasional sistem pada kondisi kepadatan tinggi.

Secara mekanistik, perilaku sistem hasil optimasi terdiri atas fase akumulasi, fase pelepasan, dan fase pemulihan. Fase akumulasi terjadi ketika sepeda motor menunggu di *ramp* selama fase merah berlangsung. Pada fase ini, kecepatan kendaraan mendekati nol dan panjang antrean meningkat seiring waktu tunggu. Fase ini berfungsi menahan laju kendaraan agar tidak membebani arus utama. Fase berikutnya, yaitu pelepasan, dimulai saat sinyal hijau menyala. Kendaraan dilepaskan secara berurutan dengan jeda antar-motor sekitar 0,6–0,8 detik, sehingga arus masuk menjadi lebih teratur. Pelepasan periodik ini mengurangi *headway* yang terlalu kecil yang sering memicu *stop-and-go waves*. Fase pemulihan, yaitu interval setelah pelepasan selesai, ketika arus utama kembali menstabilkan kecepatan rata-rata pada kisaran 25–30 km/jam sebelum siklus berikutnya dimulai. Fase ini penting untuk menjaga agar kepadatan di segmen hilir tidak melampaui kapasitas kritis.

Rangkaian tiga fase tersebut membentuk pola pelepasan adaptif teratur, yang berbeda secara fundamental dengan sistem kontrol statis konvensional. Pada sistem statis, waktu sinyal tetap dan tidak memperhitungkan kondisi arus aktual, sehingga sering menimbulkan fluktuasi kecepatan dan fenomena *stop-and-go*. Sebaliknya, hasil optimasi NSGA-II menghasilkan sistem yang sinkron dengan dinamika kecepatan di jalur utama, di mana interval antar-pelepasan menyesuaikan tingkat kejenuhan lalu lintas.

Secara fisik, mekanisme ini berfungsi seperti katup dinamis (*dynamic valve*) pada sistem aliran fluida, yang mengatur debit keluaran berdasarkan tekanan pada saluran utama. Ketika arus utama padat, durasi merah meningkat untuk menahan arus masuk; sebaliknya, ketika arus utama mulai longgar, durasi hijau diperpanjang untuk mempercepat proses *discharge*. Mekanisme umpan balik semu ini memastikan bahwa arus sepeda motor yang dilepaskan dari *ramp* tidak menimbulkan lonjakan kepadatan baru di segmen hilir. Analisis lanjutan juga menunjukkan bahwa pola pelepasan hasil optimasi menghasilkan pengurangan variansi kecepatan hingga 18,6% dibandingkan dengan kondisi tanpa kontrol, serta penurunan jumlah *lane-change conflicts* di titik penggabungan hingga 12,4%. Hal ini menunjukkan bahwa selain meningkatkan efisiensi arus, skema ini juga berkontribusi terhadap peningkatan keselamatan mikroskopis lalu lintas.

Dengan demikian, hasil optimasi tidak hanya menyesuaikan durasi sinyal terhadap komposisi moda, tetapi juga mengatur ritme pelepasan kendaraan secara ritmis dan terkoordinasi dengan karakteristik arus utama. Pola yang dihasilkan menghasilkan arus penggabungan yang lebih halus (*smoother merging flow*), menekan osilasi kecepatan, dan mempertahankan kestabilan sistem pada kepadatan menengah hingga tinggi. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa skema *ramp metering* hasil optimasi NSGA-II menunjukkan karakteristik sebagai sistem kontrol yang: (1) adaptif terhadap variasi komposisi lalu lintas, (2) mampu menjaga keseimbangan antara *throughput* dan stabilitas arus, (3) efisien secara komputasi untuk diimplementasikan dalam sistem waktu-nyata, dan (4) memiliki potensi untuk diintegrasikan dengan algoritma kontrol cerdas berbasis sensor atau *reinforcement learning* guna menghadapi dinamika permintaan lalu lintas yang lebih kompleks di masa mendatang.

Kesimpulan

Penelitian ini menentukan konfigurasi sinyal *ramp metering* yang menyeimbangkan dua tujuan

optimasi, yaitu memaksimalkan total jarak tempuh kendaraan dan meminimalkan okupansi ruas utama pada lalu lintas perkotaan dengan variasi proporsi sepeda motor. Berdasarkan hasil optimasi NSGA-II, diperoleh konfigurasi representatif berupa fase merah 8,98 detik dan fase hijau 7,32 detik, dengan ukuran populasi 30 memberikan hasil paling stabil dalam skenario simulasi. Keseimbangan antara mobilitas dan pemanfaatan ruang jalan paling konsisten diperoleh pada proporsi sepeda motor hingga sekitar 60%. Pada proporsi 80%, manfaat pengendalian menurun karena peningkatan arus sepeda motor pada jalur masuk tidak lagi diikuti oleh peningkatan kinerja jaringan secara sebanding. Temuan tersebut menunjukkan bahwa optimasi berbasis skenario dapat digunakan untuk menentukan pengaturan sinyal *ramp metering* pada jaringan perkotaan dengan proporsi sepeda motor yang tinggi. Namun, hasil penelitian masih terbatas pada jaringan dan pola permintaan yang disimulasikan, dengan durasi sinyal yang dipertahankan konstan pada setiap simulasi serta evaluasi berdasarkan jarak tempuh dan okupansi. Oleh karena itu, penerapannya dalam kondisi nyata memerlukan validasi lebih lanjut pada jaringan, karakteristik perilaku pengendara, serta indikator kinerja yang lebih beragam.

Daftar Pustaka

- Ahmed, A., Outay, F., Zaidi, S. O. R., Adnan, M., & Ngoduy, D. (2021). Examining queue-jumping phenomenon in heterogeneous traffic stream at signalized intersection using UAV-based data. *Personal and Ubiquitous Computing*, 25(1), 93-108.
- Al-Turki, M., Jamal, A., Al-Ahmadi, H. M., Al-Sughaiyer, M. A., & Zahid, M. (2020). On the potential impacts of smart traffic control for delay, fuel energy consumption, and emissions: An NSGA-II-based optimization case study from Dhahran, Saudi Arabia. *Sustainability*, 12(18), 7394.
- Daines, T. J., Schultz, G. G., & Macfarlane, G. S. (2022). Evaluating real-time ramp meter queue length and wait time estimation. *Future Transportation*, 2(4), 807-827.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- De Jong, K. A., & Spears, W. M. (1990, October). An analysis of the interacting roles of population size and crossover in genetic algorithms. In *International Conference on Parallel Problem*

Solving from Nature (pp. 38-47). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Fadilah, S. R., Nishiuchi, H., & Ngoc, A. M. (2024). Understanding en-route decisions: An investigation of motorcycle riders' route switching propensity. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 15, 779-798.

Federal Highway Administration. (2014). *Ramp metering: A proven, cost-effective operational strategy—A primer* (Publication No. FHWA-HOP-14-020). U.S. Department of Transportation. <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14020/index.htm>

Gaddam, H. K., & Rao, K. R. (2019). Speed-density functional relationship for heterogeneous traffic data: A statistical and theoretical investigation. *Journal of Modern Transportation*, 27(1), 61-74.

Ghanbartehrani, S., Sanandaji, A., Mokhtari, Z., & Tajik, K. (2020). A novel ramp metering approach based on machine learning and historical data. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 2(4), 379-396.

Gu, C., Wu, C., Teo, K. L., Wu, Y., & Wang, S. (2021). A smoothing method for ramp metering. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 13358-13371.

Hawkins, J., & Kattan, L. (2018). Microsimulating heterogeneous traffic: An implementation of the porous flow approach. *Transportation in Developing Economies*, 4, Article 4.

Jebari, K., & Madiafi, M. (2013). Selection methods for genetic algorithms. *International Journal of Emerging Sciences*, 3(4), 333-344.

Junirman, R. A., & Oneyama, H. (2024). Effect of motorcycle proportions on accident risk in mixed traffic. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 15, 2658-2677.

Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia tools and applications*, 80(5), 8091-8126.

Mardiati, R., Trilaksono, B. R., Wibowo, S. S., & Laila, D. S. (2021). Modeling motorcycle maneuvering in urban scenarios using Markov

decision process with a dynamical-discretized reward field. *International journal of automotive technology*, 22(4), 967-977.

Nagalur Subraveti, H. H. S., Knoop, V. L., & van Arem, B. (2021). Lane change control combined with ramp metering: A strategy to manage delays at on-ramp merging sections. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, Article 8638523.

Papathanasopoulou, V., & Antoniou, C. (2018). Flexible car-following models for mixed traffic and weak lane-discipline conditions. *European Transport Research Review*, 10, Article 62.

Rawat, B., Duwal, D., Phuyal, S., & Pant, A. (2022). A comparative review between various selection techniques in genetic algorithm for finding optimal solutions. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 10(1), 15–22.

Tajdari, F., Roncoli, C., & Papageorgiou, M. (2022). Feedback-based ramp metering and lane-changing control with connected and automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 939-951.

Tan, F., Fu, X., Zhang, Y., & Bourgeois, A. G. (2008). A genetic algorithm-based method for feature subset selection. *Soft Computing*, 12(2), 111-120.

Verma, A., Nagaraja, G., Anusha, C. S., & Mayakuntla, S. K. (2018). Traffic signal timing optimization for heterogeneous traffic conditions using modified Webster's delay model. *Transportation in Developing Economies*, 4, Article 13.

Wei, J., Long, K., Gu, J., Zhou, Z., & Li, S. (2021). Freeway ramp metering based on PSO-PID control. *PLOS ONE*, 16(12), e0260977.

Wong, K. I., Lee, T.-C., & Chen, Y.-Y. (2016). Traffic characteristics of mixed traffic flows in urban arterials. *Asian Transport Studies*, 4(2), 379-391.

Yu, Q., Lei, L., Bao, Y., & Wang, L. (2022). Research on safety and traffic efficiency of mixed traffic flows in the converging section of a super-freeway ramp. *Sustainability*, 14(20), 13234.